

文章编号: 1003-501X(2008)08-0015-05

# 共面多目标交会方法及误差分析

闫海霞<sup>1a, 1b</sup>, 刘岩俊<sup>2</sup>

- (1. 吉林大学 a. 电子科学与工程学院 集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区;  
b. 通信工程学院 信息产业部信息科学实验室, 长春 130012;  
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

**摘要:** 针对多台弹道相机使用前方交会方法进行地面附近同时多炸点目标测量时出现大量假目标问题, 本文提出剔除共面多目标交会产生的假目标方法和提高测量精度的偏最小二乘多元回归分析方法。该方法根据多台测量分站交会点共面差, 剔除交会产生的假目标; 将属于该目标的多个测量数据, 采用偏最小二乘多元回归分析方法, 求出目标点在大地坐标系的最佳估计值。实际数据结果表明, 该方法有效地识别 20 个以上同时爆炸的共面目标, 与两站交会方法相比, 偏最小二乘方法减小测量误差 6" 以上。

**关键词:** 光学测量; 偏最小二乘; 弹道相机; 共面; 交会

中图分类号: V556.2

文献标志码: A

## Method of Coplanar Multiple Targets Intersection and Error Analysis of Measurement

YAN Hai-xia<sup>1,3</sup>, LIU Yan-jun<sup>2</sup>

- (1. a. State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Electronic Department; b. Laboratory of Information Science, Communication Engineering College, Jilin University, Changchun 130012, China;  
2. Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** To delete false intersection results produced by multiple trajectory cameras when they measure the multiple near ground coplanar targets with basic intersection method, a method for deleting false targets and improving the intersection accuracy with partial least squares multiple factors regression analysis is presented. Based on the distance between the multiple intersection results, the false targets can be recognized. The best estimation data of target on earth coordinates can be computed with the Partial Least Squares (PLS) multiple factors regression analysis method. Actual test results show that the method can recognize more than 20 coplanar targets which are near ground, and compared with two station intersection methods, PLS reduces measurement error more than 6".

**Key words:** optical measurement; partial least squares (PLS); trajectory camera; coplane; intersection

## 1 引言

弹道相机是一种固定式光学外弹道测量设备, 其特点是视场大, 可以覆盖被测目标的可能分布范围; 测量精度高, 目前弹道相机测角精度可以达到 10" 以上。弹道相机已经成为靶场测量的重要设备, 广泛应用到靶场测量当中<sup>[1-2]</sup>。弹道相机进行三维测量采用前方交会法, 将同一时刻两台弹道相机对应同一目标的两个像点进行交会处理, 从而确定该时刻目标在大地坐标系下位置坐标, 每台弹道相机的外方位元素通过精确大地测量方法获得, 内方位元素由相机标定获得。

收稿日期: 2007-12-14; 收到修改稿日期: 2008-03-07

作者简介: 闫海霞(1977-), 女(汉族), 吉林通化人, 博士研究生, 研究方向为信号处理。E-mail: yanhx@jlu.edu.cn

通信作者: 刘岩俊(1978-), 男(汉族), 吉林长春人, 博士研究生, 研究方向为光电测量设备、数字图像处理。E-mail: liuyanjun@ciomp.ac.cn

目前,对交会测量的研究范围很广泛,研究重点集中在多目标交会匹配算法<sup>[3-4]</sup>、交会精度分析<sup>[5-7]</sup>、交会测量公式的推导<sup>[8-9]</sup>,但对于共面多目标现象的研究很少。本文重点讨论了共面多目标的假目标剔除方法,提出了利用多站数据进行假目标剔除,该方法有效地剔除交会产生的假目标点;并对多台测量分站的测量数据使用偏最小二乘(PLA)多元回归分析方法,提高测量精度。实验结果表明,该方法有效地识别 20 个以上同时爆炸的共面目标,与两站交会方法相比,偏最小二乘法提高测量精度 6" 以上。

## 2 前方交会测量法

### 2.1 交会测量原理

如图 1 所示,根据前方交会法测量原理,  $(O-X, Y, Z)$  为大地坐标系,  $OX$  轴指向大地正北或射向,  $OY$  轴指向天顶,  $OZ$  轴按右手定则确定。两台弹道相机的在大地坐标系中的坐标分别为  $O_i(X_i, Y_i, Z_i)$ 、 $O_j(X_j, Y_j, Z_j)$ , 两台弹道相机测量目标  $T$  点的方位角分别为  $A_i$ 、 $A_j$ , 高低角分别为  $E_i$ 、 $E_j$ 。  $i, j=1, 2, 3, 4$  表示分站序号。

根据几何投影关系,利用两个测量分站在大地坐标系下坐标与分站测得目标点的方位角与俯仰角,可以解算出目标点  $T$  在大地坐标系内的坐标  $T(X_t, Y_t, Z_t)$ , 交会方法有两种:水平投影法、垂直投影法,当测量分站测得目标点的俯仰角大于  $45^\circ$  时,使用垂直投影法进行交会,交会误差会小于水平投影法。反之,水平投影法的测量精度要高。

这里以水平投影法为例,给出测量分站  $i$  与测量分站  $j$  的交会测量结果  $T(X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij})$  的计算公式。

$$\begin{cases} X_{i,j} = X_i + \frac{(X_i - X_j) \tan E_j - (Z_i - Z_j)}{\tan A_i - \tan A_j} \\ Y_{i,j} = Y_i + \frac{(X_i - X_j) \tan E_j - (Z_i - Z_j)}{\tan A_i - \tan A_j} \sec A_i \tan E_i \\ Z_{i,j} = Z_i + \frac{(X_i - X_j) \tan E_j - (Z_i - Z_j)}{\tan A_i - \tan A_j} \tan A_i \end{cases} \quad (1)$$

### 2.2 测量误差的评定

由前方测量法测量原理可以得出,测量分站  $i$  与测量分站  $j$  的交会测量结果  $T(X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij})$ , 测量分站  $j$  与测量分站  $i$  的交会测量结果  $T(X_{ji}, Y_{ji}, Z_{ji})$ 。定义异面直线距离式(2)为共面差,可以评价测量精度。当共面差  $d$  大于设备在该作用距离下的测量精度时,在设备俯仰角大时,可以使用共面差剔除交会出的假目标点。

$$\begin{cases} S = \sqrt{(X_{ij} - X_{ji})^2 + (Z_{ij} - Z_{ji})^2}, E = \arccos\left(\frac{X_{ij} - X_{ji}}{S}\right), \\ d = \frac{S [\sin A_i \cos A_j \sin(A_j - E) - \cos A_i \sin A_j \sin(A_i - E)]}{\sqrt{1 - [\cos A_i \cos A_j \cos(A_i - A_j) + \sin A_i \sin A_j]^2}} \end{cases} \quad (2)$$

## 3 共面多目标交会实现策略

当测量分站  $i$  与测量分站  $j$  均只有一个目标点时,使用式(1)可以直接确定目标点  $T$  在大地坐标系下坐标。当同时多炸点数目为  $N$  时,两台测量分站可以交会出  $N^2$  个目标点、三台测量分站可以交会出  $N^3$  个目标点、四台测量分站可以交会出  $N^4$  个目标点。当  $N=10$  时,四台测量分站可以交会出 10 000 个目标点,而且由于目标都接近地面,各目标点的高程都基本相同,如何从 10 000 个目标点中识别出 20 个真目标是本文需要解决的问题。

### 3.1 共面多目标问题的提出

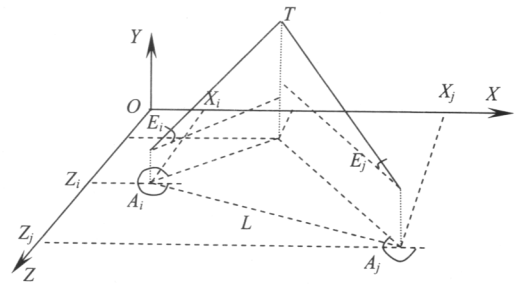


图 1 交会测量基本原理

Fig.1 Basic principle of intersection measurement

现以 2 台测量站, 2 个目标点分析共面多目标问题。当同时在地面附近爆炸两个不重合目标时, 在测量分站上分别成像两个目标, 如图 2 所示。射线  $L_i$ 、 $L_j$  与射线  $R_i$ 、 $R_j$  会有四个交会  $P_{i1}$ 、 $P_{i2}$ 、 $P_{j1}$ 、 $P_{j2}$ 。由于两个目标点在大地坐标系中的高程很接近, 所以其共面差  $d$  均很小。简单使用共面差  $d$  作为判断标准, 不能剔除假目标点。

### 3.2 共面多目标问题的解决

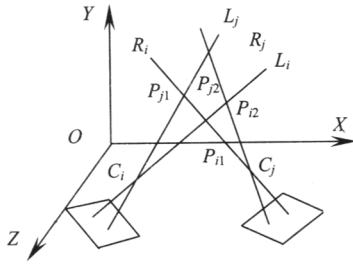


图 2 共面多目标问题

Fig.2 Coplanar multiple targets

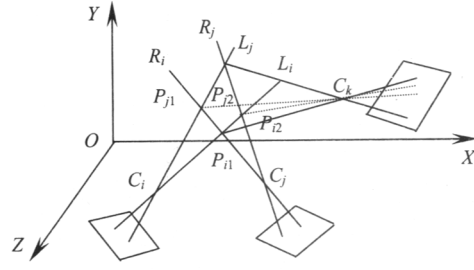


图 3 共面多目标的假目标剔除方法

Fig.3 Deleting false target method of coplanar multiple targets

如图 3 所示, 两台测量站交会出的四个目标点  $P_{i1}$ 、 $P_{i2}$ 、 $P_{j1}$ 、 $P_{j2}$  根据式(3)向第三测量站的像面投影, 判断投影点与第三台测量站上与像点的距离  $\Delta d$ , 当距离  $\Delta d$  大于设备的测量精度要求时, 该交会点为假目标点, 当距离小于设备的测量精度要求时, 该交会点为真目标点。其中  $A_3$ 、 $E_3$  是 1、2 站交会点向第三台测量站投影的空间指向角度,  $A'_3$ 、 $E'_3$  是第三台测量站的方位角与高低角,  $f_3$  是测量分站 3 的焦距。

$$\begin{cases} A_3 = \arctan\left(\frac{Z_{i2} - Z_3}{X_{i2} - X_3}\right), E_3 = \arctan\left(\frac{Y_{i2} - Y_3}{\sqrt{(X_{i2} - X_3)^2 + (Z_{i2} - Z_3)^2}}\right) \\ \Delta x = \tan A_3 \cdot (f_3 \cos E'_3 + \Delta y \sin E'_3), \Delta y = \frac{\tan E_3 \cos E'_3}{f_3 \sin E'_3 \cos A_3}, \Delta d = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \end{cases} \quad (3)$$

由于测量设备本身存在测量误差, 向第三台测量站投影时, 小于精度要求的目标点数目会大于第三台测量站提出的目标点数目。此时要求向第四台测量分站投影, 进一步剔除假目标点, 下面给出四台测量分站  $N$  个目标点识别算法步骤:

- 1) 根据式(1)测量分站 1 与测量分站 2 交会  $N^2$  个目标点;
- 2) 根据式(2)判断满足共面差  $d$  指标的目标点数据  $M$ , 共面差  $d$  根据设备精度和作用距离获得;
- 3) 将  $M$  个目标点向第三台测量分站投影, 计算在第三台测量分站的  $M$  个像点坐标;
- 4) 将  $M$  个像点坐标与第三台测量分站提取出的像点坐标比较, 计算  $\Delta d$ , 误差小于设备测量精度为有效目标点, 数目为  $K$ ;
- 5) 将  $K$  个目标点向第四台测量分站投影, 重复步骤 2)、3)、4), 直到真目标数目为  $N$ 。

### 3.3 多目标共面交会的误差分析

这样只有四台测量分站都有目标点的情况下, 才能进行交会计算。四台测量分站使用式(1)进行交会计算会有 12 个测量结果, 其中存在冗余信息, 如何从 12 个测量结果中获得最佳测量值, 可以使用偏最小二乘多元回归分析方法(PLS)。偏最小二乘非线性回归分析是由 Wold 在 1989 年提出, 是建立在主成份分析和主成份回归基础上的一种多元数据分析方法<sup>[10]</sup>。算法过程如下:

首先将四台测量分站交会式(1)写成式(4)的矩阵形式:

$$W = UQ^T = \sum u_k q_k \quad (4)$$

其中:  $Q = [X, Y, Z]^T$ ,  $W_i = X_i$ ,  $W_{i+6} = Y_i$ ,  $W_{i+12} = Z_i$ ,  $k = 0, 1, \dots, 17$

式中:  $W$  是两台测量站之间在各个方向上的交会结果,  $U$  是预测矩阵,  $Q$  是目标点在大地坐标系下的坐标值。  $u_k$  是  $A_i$ 、 $E_i$  的非线性系数,  $q_k$  是  $A_i$ 、 $E_i$ 。

第  $i$  台弹道相机与目标点  $T(X_t, Y_t, Z_t)$  在大地坐标系下投影关系如式(5)所示:

$$\tan A'_i = \frac{Z_t - Z_i}{X_t - X_i}, \tan E'_i = \frac{Y_t - Y_i}{\sqrt{(X_t - X_i)^2 + (Z_t - Z_i)^2}}, i = 1, 2, 3, 4 \quad (5)$$

将式(5)按式(6)所示的矩阵形式表达:

$$V = TP^T = \sum t_k p_k \quad (6)$$

其中:

$$P = [A_i, E_i]', V_i = A_i, V_{i+4} = E_i, k = 0, 1, \dots, 7$$

式中:  $V$  是测量设备的方位角和高低角,  $T$  是被预测矩阵,  $P$  是目标点对应每台测量分站的水平和垂直方向的空间指向角度  $A_i, E_i, t_k$  是目标点  $T(X_i, Y_i, Z_i)$  的非线性系数,  $p_k$  是  $T(X_i, Y_i, Z_i)$  在大地坐标系的坐标值。

对式(4)和式(6)使用交叉验证(Cross validation, CV)方法, 叠代出  $W$  的测量结果。其过程如下:

- 1) 令  $W_0 = [X_{12}, Y_{12}, Z_{12}]$ 、 $V_0 = [A_1, E_1]$  作为初始值;
- 2) 从  $V_{k-1}$  消去  $t_k$ , 形成  $V_k$ ; 从  $W_{k-1}$  消去  $u_k$ , 形成  $U_k$ ;
- 3) 判断  $U_k$  是否满足测量精度, 满足精度时, 计算结束; 否则, 重复步骤 2)。

由于  $V_k, U_k$  是非线性函数, 在计算过程中需要使用回归系数, 使用式(7)计算  $V_k, U_k$  的残差矩阵:

$$\begin{cases} p_k = (\partial V_k / \partial t_k \cdot t_k) / \|t_k\|^2 \\ q_k = (\partial W_k / \partial q_k \cdot u_k) / \|u_k\|^2 \end{cases} \quad (7)$$

## 4 实验结果分析

算法使用 VC 6.0 语言实现。在多目标作用能力检测实验中, 在地面上按  $4 \times 5$  矩阵形式方式放置目标点, 四台测量站采用一字布站方式, 测量示意图如图 4 所示。测量分站与目标点在大地坐标系下位置均采用精密大地测量方法获得。由于目标点都在同一水平面上, 在测量分站像面坐标系下的像点都在同一直线上, 目标点在大地坐标系的纵坐标基本相同, 如图 4 所示。其中目标中心区域到四台测量站的距离为 3 km。各台弹道相机的测角精度均方差为  $40''$ 。在 3 km 作用距离下, 共面差  $d$  小于 0.58 m 即满足精度要求,  $\Delta d$  小于 0.769 2 像元为满足测量精度的目标点, 四台测量分站分别有 20 个目标点, 两两交会结果为 160 000 个目标点。使用投影方法, 可以准确地识别出 20 个真目标点。

使用 PLS 方法计算出的交会结果与两站交会结果所图 5 所示, 其中实线表示使用多元回归分析方法得出的目标点坐标与目标点真值之差。虚线表示两台测量站交会法得出的目标点坐标与目标点真值之差。从图中可以明显看到偏最小二乘多元回归分析方法的测量误差小。图 5(a)、图 5(b)、图 5(c)分别是  $X$  方向误差、 $Y$  方向误差、 $Z$  方向误差。其中  $X$  方向减小测量误差 0.241 395 m、 $Y$  方向减小测量误差 0.145 44 m、 $Z$  方向减小测量误差 0.091 61 m。测角精度分别提高了  $16.59''$ 、 $9.99''$ 、 $6.29''$ 。

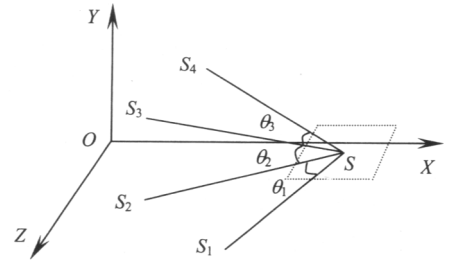


图 4 多目标检测布站图

Fig.4 Actual data recognition results

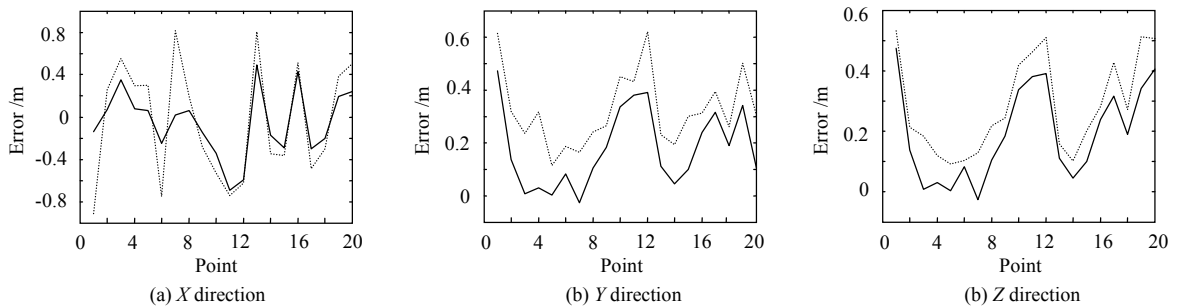


图 5 交会误差比较

Fig.5 Intersection error comparison

## 5 结 论

本文充分利用了四台大视场、高精度弹道相机的测量数据,解决了同时地面多炸点的假目标剔除问题,该方法可以识别出 20 个以上的同时地面多炸点目标,同时使用偏最小二乘多元回归分析方法有效地提高了测量精度。

### 参考文献:

- [1] FENG Meng-hong, LI Lin, HUANG Yi-fan, *et al.* Research on CCD intersection measuring techniques in detecting multiple targets [J]. **SPIE**, 2002, **4832**: 538-540.
- [2] 何小勇, 吴钦章, 高晓东, 等. 光电经纬仪子弹多子弹轨迹交会法[J]. 光电工程, 2006, **33**(9): 15-18.  
HE Xiao-yong, WU Qin-zhang, GAO Xiao-dong, *et al.* Trajectory intersection method for missile bullets' multiple ballistic of opto-electronic theodolite [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2006, **33**(9): 15-18.
- [3] 柴饶军, 纪大山, 马彩文. 电视经纬仪复杂多目标交会测量点匹配算法[J]. 光电工程, 2004, **31**(9): 29-32.  
CHAI Rao-jun, JI Da-shan, MA Cai-wen, *et al.* Points matching algorithm for sophisticated multitarget intersection of TV theodolite [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2004, **31**(9): 29-32.
- [4] Chen J, Clarke T A, Robson S, *et al.* An optimised target matching based on a 3-D space intersection and a constrained search for multiple camera views [J]. **SPIE**, 1994, **2350**: 324-335.
- [5] 高 策, 乔彦峰. 光电经纬仪测量误差的实时修正[J]. 光学 精密工程, 2007, **15**(6): 846-851.  
GAO Ce, QIAO Yan-feng. Real-time error-correction method for photoelectrical theodolite [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2007, **15**(6): 846-851.
- [6] 王向军, 韩双来. 弹落点坐标测量系统的快速校准方法及精度分析[J]. 光学 精密工程, 2005, **13**(6): 686-690.  
WANG Xiang-jun, HAN Shuang-lai. A high speed camera calibration method in coordinate measurement of bomb-fall and its precision analysis [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2005, **13**(6): 686-690.
- [7] Kamen E W. Multiple target tracking based on symmetric measurement equations [J]. **IEEE Transactions on Automatic Control**, 1992, **37**(3): 371-374.
- [8] 苏理云, 吴钦章, 高晓东, 等. 基于模糊聚类的光电经纬仪多子弹弹道测量[J]. 光电工程, 2006, **33**(10): 5-8.  
SU Li-yun, WU Qin-zhang, GAO Xiao-dong, *et al.* Opto-electronic theodolite multiple ballistic test based on fuzzy c-means clustering [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2006, **33**(10): 5-8.
- [9] 吕帅华, 苏秀琴, 张占鹏, 等. 一种基于高斯-牛顿法的光电经纬仪交会测量算法[J]. 光电工程, 2006, **33**(11): 22-25.  
LÜ Shuai-hua, SU Xiu-qin, ZHANG Zhan-peng, *et al.* Algorithm of opto-electronic theodolite intersection based on Gauss-Newton method [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2006, **33**(11): 22-25.
- [10] Wegelin J A. A survey of partial least squares(PLS) methods with emphasis on the two-block case [D]. Seattle: Department of statistics, university of Washington, 2000.



本期组稿: 陈伟明

责任编辑: 杨淇名

英文编辑: 庞 洪

标 引: 曹 强